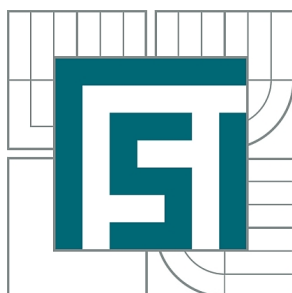




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

**ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

## **HAVÁRIE MOSTU SILVER BRIDGE V POINT PLEASANT - ROZBOR PŘÍČIN HAVÁRIE**

POINT PLEASANT BRIDGE COLLAPSE - CASUAL ANALYSIS OF THE ACCIDENT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JIŘÍ JAGOŠ**

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. LIBOR VÁLKA, CSc.**

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jiří Jagoš

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Havárie mostu Silver Bridge v Point Pleasant - rozbor příčin havárie**

v anglickém jazyce:

### **Point Pleasant bridge collapse - casual analysis of the accident**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student na základě rešerše dostupných informací o havárii mostu provede odhad a posouzení možných příčin havárie. Dále nastíní možnosti, jejichž aplikováním bylo možné havárii zabránit. Vyjádří se i k případnému porušení základních konstrukčních zásad, jejichž dodržení by s velkou pravděpodobností havárii zamezilo.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je:

- z dostupných pramenů provést odhad a posouzení možných příčin havárie mostní konstrukce
- navrhnout opatření, při jejichž aplikaci by se riziko havárie značně snížilo

Seznam odborné literatury:

VELES, Pavol. Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1985, 401 s.

PETROSKI, Henry. To engineer is human: the role of failure in successful design. 1st Vintage Books ed. New York: Vintage Books, 1992, ix, 251 s. ISBN 0-679-73416-3

PETROSKI, Henry. Success through failure: the paradox of design. Princeton: Princeton University Press, c2008, xii, 235 s. ISBN 978-0-691-13642-4

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-7204-283-1

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32

Internetové zdroje:

<http://www.freewebs.com/silverbridgeaccident/thebridgecollapse.htm>

<http://museum.nist.gov/exhibits/silverbridge/>

<http://www.youtube.com/watch?v=AHKmUI3Es1Y>

<http://www.youtube.com/watch?v=o5dSVMwpG8o>

<http://www.youtube.com/watch?v=9B--mzXzMUs>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Libor Válka, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 21.1.2014

L.S.

---

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt:**

Bakalářská práce se soustředí na rozbor příčin havárie mostu Silver Bridge, ke které došlo v roce 1967, čtyřicet let od uvedení mostu do provozu.

Jsou podrobně rozebrány možné příčiny pádu mostu, a to na základě informací a faktů uvedených jak přímo ve zprávách vyšetřovacích komisí, tak v dokumentech a literárních pramenech, zabývajících se materiálovými rozbory konstrukčních uzlů havarovaného mostu.

V práci je proveden kritický rozbor dostupných a relevantních informací o havárii.

Jsou nastíněny možné příčiny pádu mostu jak z konstrukčního hlediska, tak z hlediska materiálového.

## **Abstract:**

The bachelor thesis is focused on the analysis of the causes of the accident of the Silver Bridge, which occurred in 1967, forty years since the introduction of the bridge to the traffic.

In the work are discussed in detail all possible causes of the collapse of the bridge on the basis information and facts mentioned both directly in the inquiry reports of committees, as well as in documents and literary sources, dealing with material analysis of the structural nodes of the wrecked bridge.

The work carried out critical analysis of the available and relevant information about the crash.

The bachelor thesis outlines also the possible causes of the fall and collapse of the bridge from structural point of view and from terms of the material.

## **Klíčová slova:**

Silver Bridge, havárie, nestabilní lom, koroze pod napětím, Point Pleasant, Kanagau

## **Keywords:**

Silver Bridge, collapse, unstable fracture, stress corrosion, Point Pleasant, Kanagau

**Bibliografická citace:**

JAGOŠ, J. *Havárie mostu Silver Bridge v Point Pleasant – rozbor příčin havárie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 23 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Libor Válka, CSc.

**Prohlášení:**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 26.05.2014

.....  
Jiří Jagoš

**Poděkování:**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Liboru Válkovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

1. Úvod.....	2
2. Historické pozadí .....	3
3. Rozbor konstrukce mostu Silver Bridge .....	4
3.1. Visutý systém.....	4
3.2. Nosné věže.....	5
3.3. Rozměry mostu .....	6
4. Rozbor havárie.....	7
4.1. Určení kritického prvku.....	7
4.2. Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli v okolí lomu .....	10
5. Pravděpodobné příčiny pádu .....	16
5.1. Konstrukce visutého řetězu .....	16
5.2. Součinitele bezpečnosti .....	16
5.3. Napětí v okolí otvoru pro čep .....	16
5.4. Volba použitého materiálu .....	19
5.5. Koroze pod napětím .....	19
6. Závěr .....	20
7. Použitá literatura .....	21
8. Seznam použitých symbolů a zkratek.....	22
9. Seznam obrázků a tabulek.....	23



## 1. Úvod

*“řetěz je pouze tak pevný jako jeho nejslabší člen”  
staré moudro*

Bakalářská práce se zabývá havárií mostu postaveného roku 1928 mezi americkými státy Západní Virginie a Ohia, který spojoval města Point Pleasant a Kanauga. Tento most se téměř po 40 letech fungování zřítil, viz obr. 1. Ke zřícení mostu došlo 15. prosince roku 1967, přibližně v 17 hodin. Zřícení mostu trvalo pouhých 60 sekund. Na mostě bylo v tuto dobu 37 automobilů a 31 z nich se zřítilo do řeky Ohio spolu s mostem. Výsledný počet mrtvých byl 44 a dvě osoby nebyly nikdy nalezeny. Devět lidí bylo vážně zraněno. Teplota okolí v době havárie byla přibližně -1°C [1].



Obr. 1 Havárie mostu Silver Bridge [1]

Americký prezident spolu se svými poradci formuloval brzy po havárii tři zásadní úkoly. Prvním bylo prověřit stávající metody inspekcí mostů a ohodnotit jejich účinnost. Druhým bylo naplánovat brzkou výstavbu nového mostu a třetím bylo určit příčinu havárie pod dohledem National Transportation Safety Board (NTSB) [1].

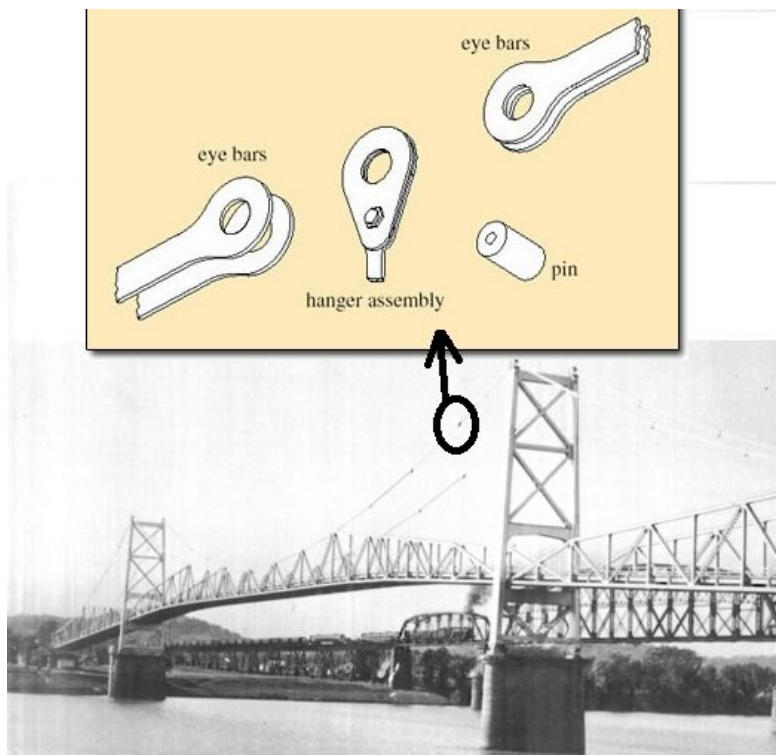
Vyšetřování havárie bylo velice důkladné. Výsledky byly publikovány v několika zprávách. Vyšetřování havárie mostu Silver Bridge způsobilo velký krok kupředu v oblasti inspekce mostů. Lze říci, že moderní historie inspekce mostů se začala psát po této havárii [1]. Každý most je svým způsobem originál, protože je vystaven rozdílným zatěžovacím či klimatickým podmínkám. Rizikových faktorů je mnoho a konstruktér s nimi musí počítat. Také musí být optimálně vyvážený poměr funkčnosti a estetičnosti mostu. Závěry vyšetřování havárie mostu Silver Bridge poukázaly na konstrukční nedostatky, které spolu s jistými materiálovými problémy byly zodpovědné za havárii mostu.

## 2. Historické pozadí

V březnu roku 1926, 69. kongres Spojených Států amerických povolil postavit most přes řeku Ohio. Stavba mostu se ukázala jako velice dobrá investice, protože výrazně zrychlila přepravu po frekventované státní silnici US 35 (kterou Silver Bridge nesl). V roce 1928, kdy byl most oficiálně otevřen, je nazýván „Brána na Jih“. Tento název vznikl spontánně a pouze potvrzuje předchozí tvrzení o důležitosti mostu. Oficiální jméno mostu však bylo Silver Bridge (dle použité nátěrové barvy) [1].

V roce 1927 (březen) firma J.E. Greiner připravila plány včetně přesných specifikací (rozměry, materiál, dovolené zatížení atd.) pro stavbu visutého mostu Silver Bridge. Součástí plánů byla i dohoda mezi firmou Greiner a zadávající firmou Ohio River Bridge Company. Dohoda obsahovala sedm bodů. Pátý z nich pojednával o tom, že pokud cena mostu bude nižší než 800 000 USD, Greiner Company obdrží (jako bonus) polovinu částky z rozdílu mezi 800 000 USD a reálnou cenou.

Greiner Company navrhla celkem tři varianty nosného visutého systému. Řešení prvních dvou variant bylo založeno na použití ocelových lan. Třetí varianta, která byla následně stavební firmou American Bridge Company vybrána (z důvodu nejnižší ceny pro výstavbu), byla tzv. „eyebar suspension system“. Tento systém se skládal z ocelových prutů, spojených za sebou do řetězu pomocí čepů a byl již v minulosti několikrát použit (podrobněji bude popsán níže). Součástí plánů této varianty provedení visutého systému byla podmínka, že stavební firma musí zajistit kompletní testy použitého materiálu a výsledky testu se musí shodovat s údaji v návrhu (podmínka plyne ze způsobu konstrukce, o které bude pojednáno později). Konstrukce visutého systému mostu Silver Bridge je patrná z obr. 2.



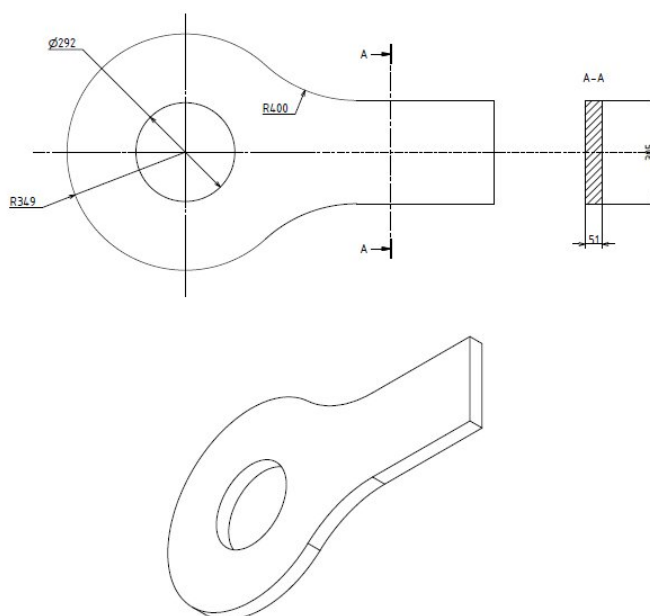
Obr. 2 Visutý most Silver Bridge [1]

### 3. Rozbor konstrukce mostu Silver Bridge

#### 3.1. Visutý systém

Pro konstrukci byl použit systém ocelových článků s oky, tzv. „eyebars”, který byl již několik desítek let úspěšně používán. Zásadním rozdílem v porovnání s klasickou konstrukcí bylo použití pouze jednoho páru „eyebar”, viz obr. 2. Konvenčně bylo používáno dvou a více párů. Tato konstrukční úprava byla umožněna díky použití vysoce pevné oceli, která byla v době výstavby mostu novinkou.

Princip zvoleného řešení je založen na spojení za sebou řazených ocelových článků obdélníkového průřezu s oky pomocí čepů. Rozměry a tvar těchto článků je uveden na obr. 3. Otvory na koncích prutů byly vyvrtány.



Obr. 3 Geometrie článků s oky, rozměry v mm

Největší a z pohledu zjišťování příčin havárie nejrozporupnější rozdíl mostu Silver Bridge a ostatních do té doby zbudovaných mostů pomocí daného visutého systému bylo, že Silver Bridge měl pouze jeden pár těchto článků s oky v řetězu ve srovnání se dvěma, někdy i čtyřmi páry prutů vedle sebe u dříve stavěných mostů. Rozlomení jednoho prutu v řetězu by v případě mostu Silver Bridge mohlo mít a také mělo katastrofické důsledky. V případě použití více prutů vedle sebe, rozlomením jednoho prutu se navýší napětí v ostatních prutech např. o 1/8 v případě použití čtyř párů prutů, což by velice pravděpodobně nevedlo k meznímu stavu mostní konstrukce a při nejbližší inspekci mostu by byl vadný kus vyměněn. Systém čtyř párů prutů je patrný z obr. 4.



Obr. 4 Visutý most Three Sister's Bridge, Pittsburgh – multiparalelní „eyebar” systém [2]

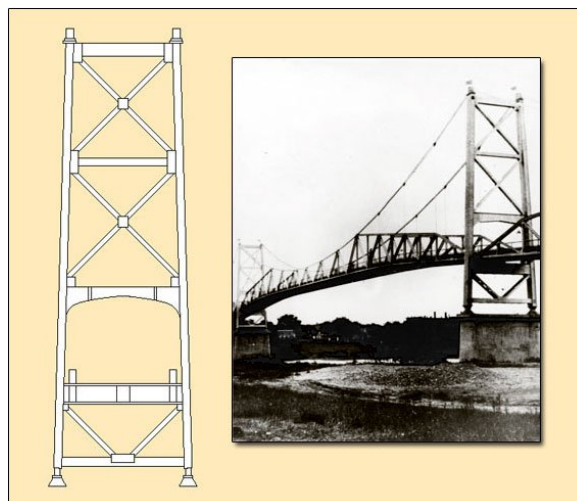
Z důvodu spojení za sebou řazených prutů pomocí čepů (tato vazba dovoluje rotaci kolem osy otvoru pro čep) téměř odpadá napětí v prutech od ohybového momentu, což je velká přednost všech visutých mostů. V prutech je po průřezu téměř konstantní tahové napětí. Složka ohybového momentu vzniká pouze kolem otvoru pro čep. Velikost tohoto ohybového momentu je možné určit z teorie silně zakřivených prutů [3].

### 3.2. Nosné věže

Uložení nosných věží dovolovalo jejich naklápění. Naklápění věží přineslo několik zásadních výhod:

- věže nepřenášely téměř žádný ohybový moment způsobený tahem od visutých řetězců. Eliminace ohybového momentu ve věžích umožnila snížit množství materiálu potřebného pro konstrukci věží
- zjednodušení napnutí visutého řetězu při stavbě (zvedání) mostu
- mostní konstrukce byla schopna reagovat jak na změny vlivem proměnného zatížení, tak na změny atmosférických podmínek (teplota, vítr)

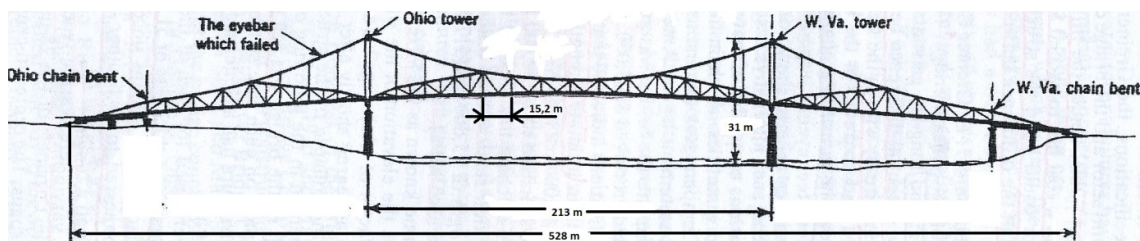
Vozovka byla spojena pouze s visutým řetězem a to pomocí svislých článků s oky. V nosných věžích tedy bylo napětí převážně tlakové, což je z konstrukčního hlediska žádoucí. Věže byly svařeny jako příhradová konstrukce, viz obr. 5 [1].



Obr. 5 Konstrukce nosných věží mostu Silver Bridge [1]

### 3.3. Rozměry mostu

Visutý most Silver Bridge, schematicky znázorněný na obr. 6, byl dlouhý 528 metrů včetně trémového příjezdového mostu z každé strany. Široký byl téměř 12 metrů, z toho vozovka byla široká 7 metrů. Podél jedné strany mostu byla sekce pro pěší a cyklisty. Součástí konstrukce byly dvě věže vysoké 31 metrů. Vzdálenost těchto věží (central span) byla 213 metrů. Spojení visutého řetězu a vozovky pomocí svislých článků s oky bylo po délce mostu každých 15,2 metrů.



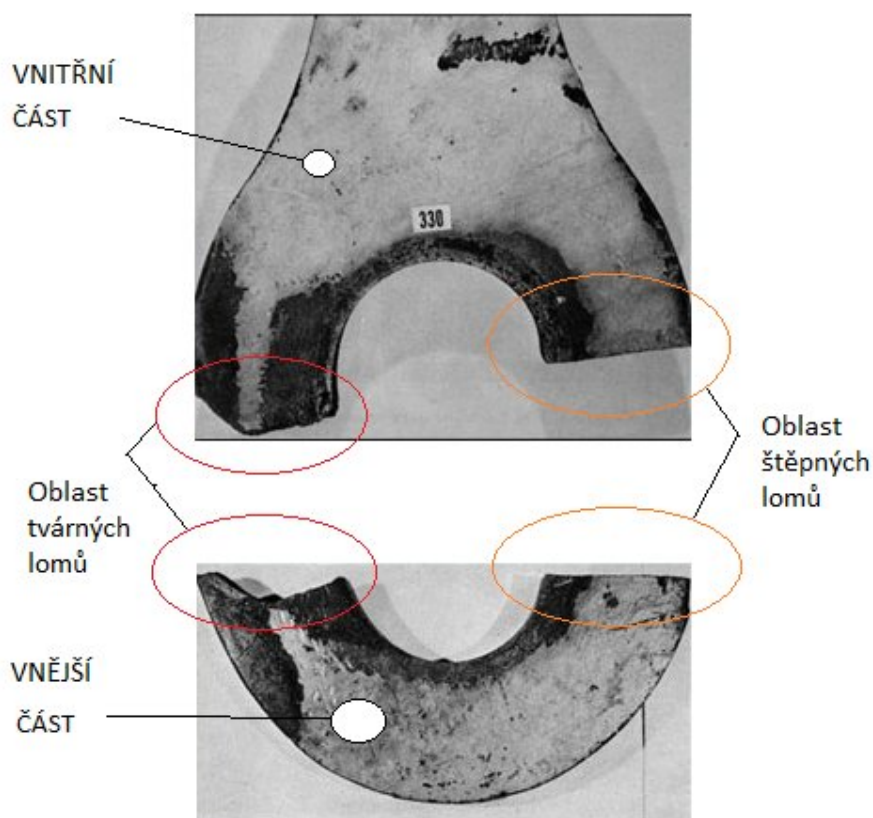
Obr. 6 Hlavní rozměry (v metrech) mostu Silver Bridge [1]



## 4. Rozbor havárie

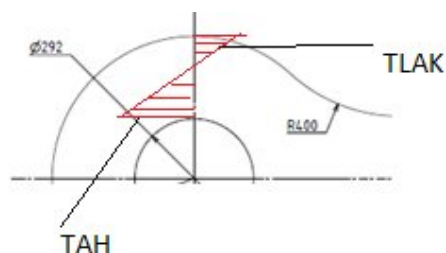
### 4.1. Určení kritického prvku

Pro vyšetření, jak přesně k havárii došlo, bylo nutné z důvodu množství svědeckých výpovědí i velkého množství trosek zvolit vyšetřovací plán. Postup vyšetřování byl ztížen tím, že mnoho trosek odnesla řeka. Po nalezení většiny trosek byly jednotlivé fragmenty označeny identifikačními čísly. Před rozesláním jednotlivých trosek k bližšímu přezkoumání do laboratoří bylo nutné snížit jejich počet. National Transportation Safety Board (NTSB) určila na základě výpovědí očitých svědků a prozkoumání trosek v místech, kde byla konstrukce nejvíce namáhána, podezřelé součásti. Takto vybrané součásti byly rozesílány do laboratoří k bližšímu přezkoumání. Jednalo se zejména o takové fragmenty, které vykazovaly známky nestabilních lomů.



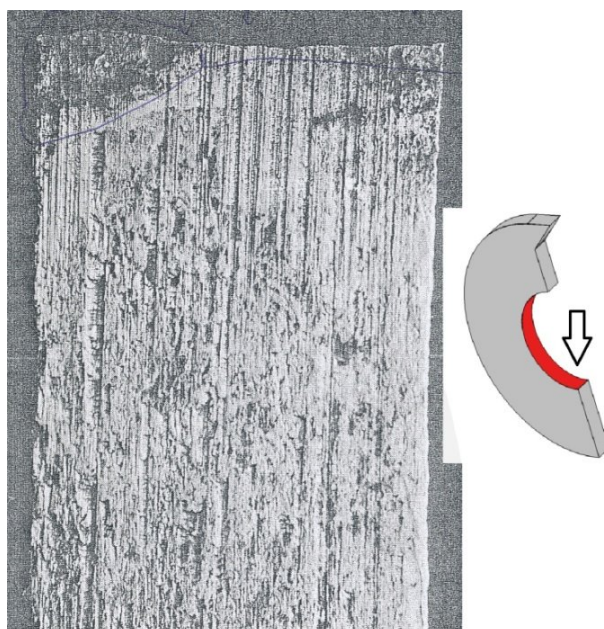
Obr. 7 Rozlomený článek s oky číslo 330. Štěpný lom na pravé straně, tvárný vlevo [4]

Součást s identifikačním číslem 330, viz obr. 7, jevila už při prvním ohledání známky štěpného lomu na jedné straně rozlomeného oka, druhá strana vykazovala charakteristické rysy tvárného lomu. Tvárný lom nastal po značné plastické deformaci, v okolí lomu byla sloupaná nátěrová barva. Lomová plocha se štěpným typem lomu nevykazovala téměř žádné znaky plastické deformace, pouze velmi malou zplastizovanou oblast na okraji, na povrchu kolmém na osu otvoru pro čep. Nátěrová barva byla v této oblasti téměř nepoškozená.



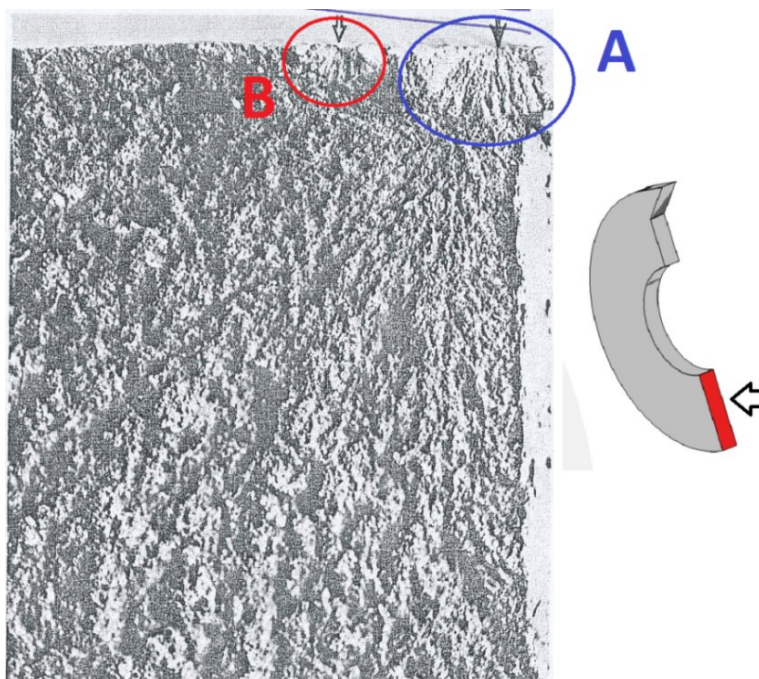
Obr. 8 Schéma průběhu ohybového napětí po průřezu kolem otvoru pro čep

Na části s tvárným lomem bylo naměřeno zúžení okolo otvoru pro čep 9 %. Loupání barvy a zúžení nasvědčuje tomu, že lom byl způsoben ohybovým namáháním ze strany otvoru pro čep, a to tahovým napětím z vnitřní strany otvoru a tlakovým napětím na okraji, viz obr. 8 (průběh napětí je pouze ilustrativní, nelze přesně určit polohu neutrální osy).



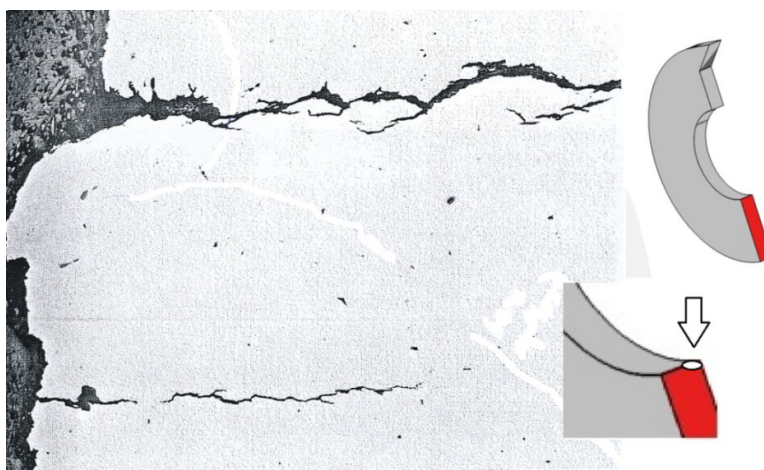
Obr. 9 Povrch otvoru pro čep přiléhající štěpné lomové ploše. Vnější kus. [4]

Dalším důležitým poznatkem je, že povrch otvoru pro čep na vnějším kusu byl téměř bez známky koroze, až na úsek přiléhající štěpné lomové ploše, viz obr. 9 (na snímku levý horní roh). Povrch otvoru na vnitřním kusu byl naopak zkorodovaný značně. To si lze vysvětlit tím, že na vnějším kusu byl velký tlak mezi čepem a otvorem, což zamezilo vniknutí korozního média [4].



Obr. 10 Štěpná lomová plocha na vnějším kusu [4]

Po očištění lomových ploch od rzi, která na nich vznikla z důvodu několikadenního pobytu pod vodou a po důkladnějším prozkoumání byly nalezeny na lomové ploše štěpného lomu dvě malé oblasti plastických deformací, které vznikly pod účinkem vysoké koncentrace napětí před čelem postupující trhliny, obr. 10. Větší oblast (písmeno A v obr. 10) měří ve svislém směru téměř 3 mm. Z těchto dvou malých zplastizovaných oblastí bylo možné rez očistit velice snadno, na rozdíl od zbytku lomové plochy. Po očištění rzi z těchto oblastí zde byl objeven velmi přilnavý, tmavě šedý neželezný materiál, pravděpodobně oxid, který byl v barevném kontrastu se zbytkem plochy [4].



Obr. 11 Rozvětvené trhliny. Zvětšení 80x [4]

Uvnitř zplastizovaných oblastí (A,B, viz obr. 10) bylo objeveno při prozkoumání pod mikroskopem mnoho trhlín. Jejich počátek byl vždy na povrchu otvoru pro čep. Obr. 9 (levý



horní roh) ukazuje, že povrch, kde mají trhliny počátek je značně zkorodovaný. Bylo rovněž zjištěno, že trhliny začínají vždy v korozních důlcích, které se vydrolily na povrchu otvoru, viz obr. 11. Trhliny byly rozvětvené a v jejich blízkosti se vždy nacházel neželezný materiál, pravděpodobně oxid. Navíc tato oblast byla pod vlivem vysokého ohybového napětí z důvodu přítomnosti otvoru pro čep, to znamená koncentrátoru napětí [4].

Větvení trhlín funguje jako tzv. deformační bariéra v případě mechanismu lomu koroze pod napětím. Sumární plocha trhlín roste a tím také roste spotřeba energie k jejich rozvoji. Trhliny díky větvení postupují pomaleji přes tloušťku stěny. Tento mechanismus lze přirovnat k vytváření plastické oblasti před čelem postupující trhliny při cyklickém namáhání. U koroze pod napětím však vlivem účinku koroze v defektních místech struktury není možné vytvářet větší plastické deformace a tedy ani dostatečně velké plastické zóny [5].

Výsledkem této fáze vyšetřování je, že v okamžiku vzniku nestabilního lomu v článku s oky č. 330 byly v materiálu (uvnitř zplastizovaných oblastí A,B) přítomné trhliny, z nichž největší měla délku 3 mm. Větvení trhlín, přítomnost korozního média a vysoké napětí v okolí otvoru pro čep naznačují, že primárním mechanismem lomu mohla pravděpodobně být koroze pod napětím [4].

Celkem bylo v laboratořích zkoumáno 45 článků z oky. Byl nalezen pouze jeden další článek s podobnou velikostí trhliny jako v případě článku č. 330. Trhlina se však nacházela v místě, kde nebyla koncentrace napětí příliš vysoká a na rozdíl od článku č. 330 nebyly nalezeny žádné další trhliny [4].

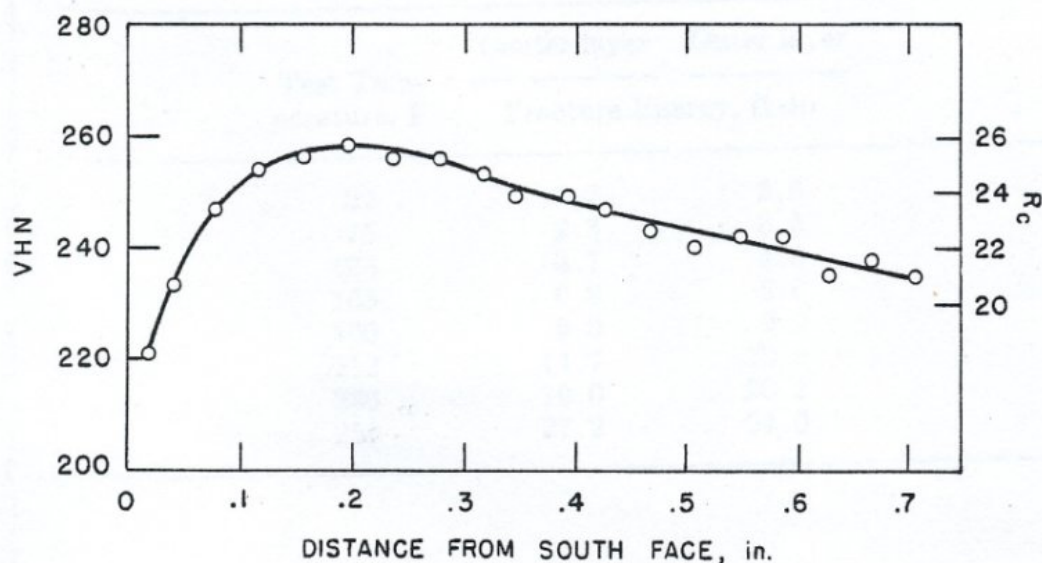
## 4.2. Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli v okolí lomu

Ocel použitá pro visutý systém Silver Bridge byla tepelně zpracována kalením do vody a následně vysokoteplotně popouštěna. Chemické složení oceli je uvedeno v tab. 1. Analýza pro určení chemického složení byla provedena na článku s oky č. 330 a dvou náhodně vybraných člancích. V tab. 1 jsou uvedeny střední hodnoty obsahu jednotlivých prvků.

Tab. 1 Chemické složení použité oceli (hm. %) [4]

C	Mn	S	P	Si	Cu, Ni, Cr,V, Mo
0,60	0,64	0,03	0,026	0,14	<0,05

Měření mechanických vlastností oceli bylo realizováno na materiálu stejných článků jako analýza chemického složení, tj. článku č. 330 a materiálu dvou náhodně vybraných článků. Články byly broušeny a leštěny v rovinách kolmých k ose otvoru pro čep. U jednotlivých výbrusů byla vyhodnocována mikrostruktura a tvrdost (dle Vickerse). Článek č. 330 byl vybrušován přímo v oblasti výskytu štěpného lomu.



Obr. 12 Závislost tvrdosti dle Vickerse směrem do středu článku s oky č. 330 [4]

Byla prokázána [4] výrazná závislost mechanických vlastností a struktury oceli na vzdálenosti od povrchu směrem ke středu článku. V rovinách u povrchu bylo zjištěno silné oduhličení. Dále od povrchu byla zjištěna martenzitická struktura oceli, která se s rostoucí vzdáleností od povrchu vzorku měnila ve strukturu feriticko-perlitickou. Nerovnoměrná struktura měla za následek proměnnou tvrdost po průřezu. Maximální hodnota tvrdosti byla ve vzdálenosti okolo 4–6 mm od povrchu, viz obr. 12. V této vzdálenosti od povrchu se nachází i dříve zmíněné dvě malé zplastizované oblasti. Oduhličení bylo výsledkem difuze uhlíku směrem k povrchu součásti a následné chemické reakci uhlíku s kyslíkem (spalování uhlíku) na povrchu součásti při ohřevu oceli na kalící teploty [6]. Díky nízkému obsahu uhlíku na povrchu součásti i těsně pod ním pravděpodobně nedošlo ke správnému zakalení povrchové vrstvy. Nerovnoměrnost vnitřní struktury byla důsledkem buď špatné prokalitelnosti použité oceli nebo nedodržení kalících časů, popř. spojení obou těchto okolností. Různé vlastnosti vykazovala ocel pouze ve směru do středu tloušťky, ve směru od povrchu otvoru pro čep byla struktura rovnoměrná. To si lze vysvětlit tím, že otvory pro čepy byly do jednotlivých článků s oky vrtány dodatečně (až po tepelném zpracování). Nemohlo tedy dojít k nerovnoměrnému ochlazování materiálu v blízkosti otvorů při tepelném zpracování.

Jak již bylo uvedeno na začátku této kapitoly, pro testy byly vybrány spolu s článkem č. 330 i dva náhodně vybrané články s oky. Výsledky ukázaly, že se hodnoty mechanických vlastností zkoušených článků mezi sebou výrazně neliší. U všech zkoušených článků byla nejnižší tvrdost na povrchu, maximální ve vzdálenosti 4–6 mm od povrchu a poté opět snižující se tvrdost až do středu tloušťky článku. Díky této skutečnosti se dala očekávat i změna ostatních materiálových charakteristik (meze kluzu, meze pevnosti, nárazové práce) po průřezu článku. Vybrané články s oky byly před odebráním vzorků pro testy rozřezány do tří vrstev. První dvě vrstvy se nacházely v blízkosti povrchů, třetí vrstva byla z oblasti středu tloušťky článků. Z takto nařezaných vrstev byl odebrán materiál k výrobě zkušebních těles pro zkoušku tahem a pro zkoušku rázem v ohybu. Vzorky pro zkoušku tahem byly odebrány tak, že jejich osa byla paralelní s tečnou k povrchu otvoru pro čep. Tažnost všech vzorků byla přibližně 50%. Naměřené hodnoty meze kluzu a meze pevnosti pro jednotlivé vrstvy jsou uvedeny v tab. 2. Průměrné hodnoty meze kluzu a meze pevnosti pro článek jako celek odpovídaly hodnotám udávaných stavební firmou ABC [4].

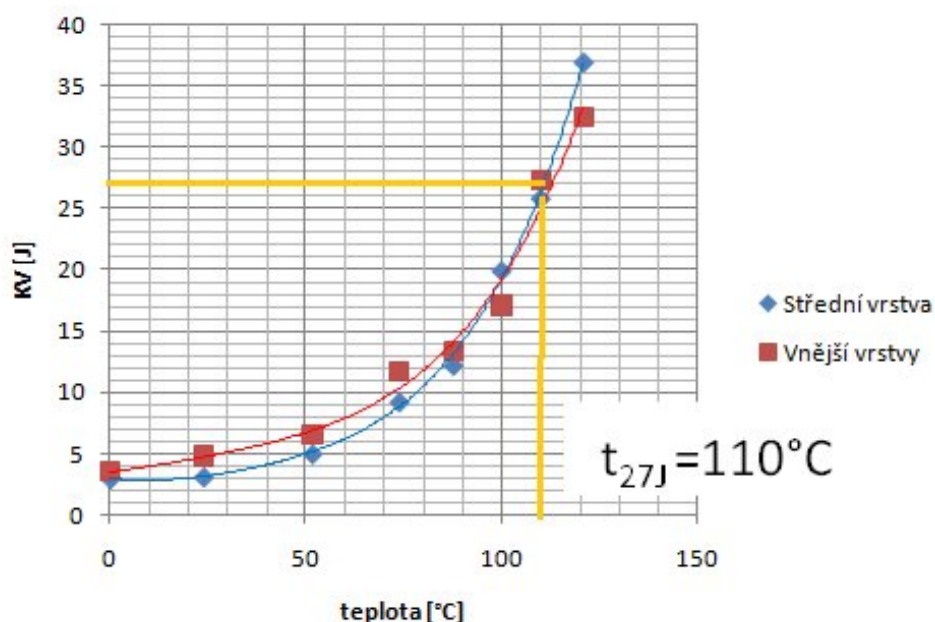
Tab. 2 Meze kluzu a meze pevnosti určené zkouškou tahem pro materiál z vnějších a střední vrstvy [4].

	Mez kluzu $R_e$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]
Vnější vrstvy	593	834,3
Střední vrstva	482,6	807
Průměrná hodnota	556,2	825,2

Zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu byla odebrána ze stejného místa jako pro zkoušku tahem. Tělesa byla opatřena V-vrubem, zkoušky byly provedeny v intervalu teplot  $(0 \div 121) ^\circ\text{C}$ . Lomová plocha většiny vzorků po zkoušce rázem v ohybu vykazovala na straně blíže povrchu zplastizovaný okraj díky značnému oduhličení povrchu článků. Průměrné hodnoty nárazové práce v závislosti na teplotě zkoušky jsou uvedeny v tab. 3 [4] a v grafu na obr. 13. V grafu je vyznačena tranzitní teplota  $t_{27J}$ , tedy teplota odpovídající hodnotě nárazové práce 27 J, což je kritériální hodnota nárazové práce používaná v doporučeních a normách při volbě materiálů pro konstrukce bezpečné z pohledu křehkého lomu.

Tab. 3 Hodnoty nárazové práce v závislosti na teplotě [4]

Teplota zkoušky [ $^\circ\text{C}$ ]	Nárazová práce $KV$ [J]	
	Střední vrstva	Vnější vrstvy
0	3,0	3,5
24	3,1	4,8
52	5,0	6,5
74	9,2	11,7
88	12,2	13,4
100	19,9	17,1
110	25,8	27,4
121	36,9	32,5



Obr. 13 Teplotní závislost nárazové práce

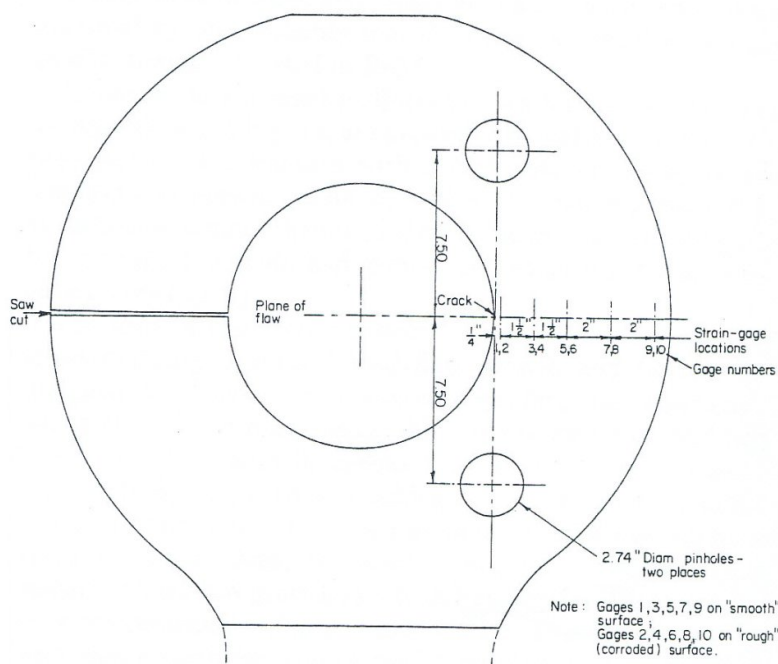
V době havárie mostu Silver Bridge byla teplota vzduchu přibližně  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Z grafu na obr. 13 je zřejmé, že při dané provozní teplotě je hodnota nárazové práce použité oceli velmi nízká ( $KV \approx 3\text{ J}$ ) a tedy odolnost materiálu vůči vzniku křehkému lomu je minimální. Z konstrukčního hlediska se jedná o nevhodnou volbu materiálu.

Zkouška rázem v ohybu je však zkouškou srovnávací. Rozhodnutí, zda mohly být rozvětvené trhliny s maximální délkou 3 mm (viz oblasti A a B v obr. 10) iniciátorem finálního lomu musí vycházet z principů lomové mechaniky [7]. Pro určení lomové houževnatosti  $K_{IC}$ , materiálové charakteristiky udávající odolnost materiálu vůči iniciaci a šíření nestabilní trhliny, byly provedeny tři typy zkoušek. Prvním typem experimentů bylo měření lomové houževnatosti na zkušebních tělesech SENB (Single Edge Notch Bend) za podmínek, odpovídajících požadavkům v současné době platné normy pro určování lomové houževnatosti kovových materiálů [8]. Druhým typem experimentů bylo měření lomové houževnatosti na tělesech s eliptickým vrubem (připraveným elektrojiskrovým řezáním) a nacyklovanou únavovou trhlinou (SFT, *surface flawed test*), kde vlastní měření lomové houževnatosti probíhalo dle požadavků norem [8]. Výše uvedené testy byly realizovány při teplotách  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  v případě těles typu SFT, resp.  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  v případě těles typu SENB. Naměřené hodnoty lomové houževnatosti  $K_{IC}$  jsou uvedeny v tab. 4. Materiál zkušebních těles pro výše uvedená měření byl odebrán z článku č. 330.

Tab. 4 Lomová houževnatost  $K_{IC}$  zjištěná pomocí SENB a SFT zkušebních těles

$K_{IC}$ [MPa m <sup>1/2</sup> ]	Teplota [°C]								
	-18			0			21		
SFT	36,9	42,4	46,2	47,3	49,5	56,1	52,8	56,1	56,7
SENB	30,8	36,3	39,6	-	-	-	51,7	58,9	-

Třetí typ experimentu byl proveden na náhodně vybraném nepoškozeném článku s oky, ve kterém byl vytvořen vrub a nacyklována únavová trhлина. Článek byl osazen deseti tenzometry, jejich rozmístění je patrné z obr. 14 (strain-gage) a několika termočlánky. Před započítím zkoušky byl článek ochlazen na teplotu přibližně 0 °C. Okraj otvoru pro čep byl, z důvodů snížení velikosti síly potřebné pro zkoušku na protější straně vytvořeného vrubu, proříznut. Do článku s oky byly vyvrtány otvory pro čepy upínacího mechanismu zatěžovacího stroje. Tyto otvory se nacházely v takové poloze, aby podmínky zatěžování simulovaly reálné zatěžovací podmínky, tzn. kombinaci ohybového a tahového zatížení. Počáteční konfigurace pro zkoušku je uvedena v obr. 14.



Obr. 14 Počáteční konfigurace pro „celočlánkovou“ zkoušku lomové houževnatosti

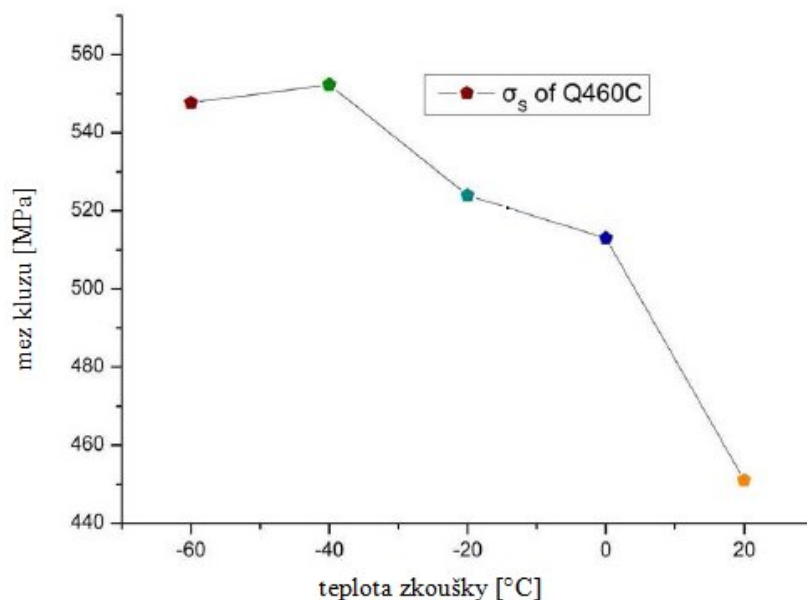
Ostrá trhлина byla vytvořena cyklickým zatěžováním, článek byl poté zatěžován jednosměrným kombinovaným namáháním (tah a ohyb) až do lomu. Deformace článku byla zaznamenávána pomocí tenzometrů a z těchto údajů byla poté vypočítaná velikost lomové houževnatosti  $K_{IC}=51 \text{ MPa m}^{1/2}$ .

Lomové napětí bylo určeno ze vztahu

$$\sigma_C = \frac{K_{IC}}{1.1\sqrt{(\pi a)/Q}}, \quad (1)$$

kde  $Q$  je tvarový faktor,  $a$  je délka trhliny (rozměr oblasti A, obr. 10).

Ze tří provedených typů zkoušek byla pro výpočet lomového napětí podle rov. (1) vybrána nejnižší zjištěná hodnota  $K_{IC}$  pro teplotu zkoušky přibližně 0°C. Velikost lomového napětí pro maximální délku trhliny  $a = 3 \text{ mm}$  byla  $\sigma_c = 607 \text{ MPa}$ . Ve výpočtu není uvažován případný vliv druhé, menší trhliny (oblast B v obr. 10), kdy může dojít ke změně napěťových poměrů díky interakci napěťových polí obou vad.



Obr. 15 Závislost meze kluzu oceli Q460C na teplotě zkoušky [9]

Z dostupných podkladů zjistitelná hodnota meze kluzu byla určena při teplotě cca 20 °C (viz tab. 2). Jak vyplývá z kap. 5.3, v okolí otvoru pro čep se hodnota napětí při maximálním dovoleném pracovním zatížení mostu mohla pohybovat právě okolo této hodnoty meze kluzu. V době havárie byla teplota vzduchu přibližně -1 °C. Je prokázáno [7], že u ocelí vzrůstá mez kluzu se snižující se teplotou. O jak velký nárůst se jedná v případě oceli použité pro most Silver Bridge nelze zjistit z důvodu absence údajů v dostupné literatuře. Pro hrubý odhad změn mechanických vlastností s teplotou byly použity údaje o teplotní závislosti meze kluzu konstrukční oceli Q460C [9]. Na obr. 15 je uvedena závislost meze kluzu na teplotě pro ocel Q460C. Zkoušky tahem byly realizovány v teplotním intervalu (-60 ÷ +20) °C. Z grafu je patrné, že v důsledku poklesu teploty z 20 °C na 0 °C došlo k nárůstu meze kluzu přibližně o 60 MPa.

Po zvážení nejistot v napjatostních poměrech na čele trhliny a přihlédnutím k možnému nárůstu meze kluzu v oceli se lze domnívat, že skutečné lomové napětí mohlo být pod mezí kluzu dané oceli a zároveň je možné, že maximální provozní napětí v blízkosti otvoru pro čep dosáhlo hodnoty lomového napětí (viz následující kapitoly). Lze tedy konstatovat, že přítomná trhlina s maximální délkou 3 mm mohla s velkou pravděpodobností způsobit nestabilní lom článku č. 330.

## 5. Pravděpodobné příčiny pádu

### 5.1. Konstrukce visutého řetězu

Použití pouze jednoho páru článků s oky ve visutém řetězu mělo za následek, že rozlomením jediného článku s oky se napětí na sousedním článku dvojnásobně zvýšilo, což znamenalo při návrhovém koeficientu mostu Silver Bridge 1,5 násobné překročení meze kluzu materiálu v řetězu, rozlomení zbylého článku v řetězu a tím i pád celého mostu. Použitím více paralelních řetězů by funkčnost celé soustavy nezávisela pouze na jediném článku [1].

Další rizikové místo v konstrukci visutého řetězu je spojení čepu a článku s oky, které nebylo žádným způsobem izolováno vůči napadení od koroze. Navíc zde docházelo k opotřebení součástí třením, díky charakteru uložení článků s oky. Pro inspekci při pravidelných kontrolách byla tato oblast prakticky nedostupná.

### 5.2. Součinitel bezpečnosti

Jak bylo zmíněno v úvodu, J. E. Greiner Company předepsala podmínku pro stavbu mostu v konstrukční variantě „eyebar system“, která stanovovala, že stavební firma musí zajistit kompletní testy materiálu a výsledky musí souhlasit s hodnotami v návrhu. Stavební firma American Bridge Company (ABC) zvolila materiál, který ve výsledku snížil předepsané součinitele bezpečnosti firmou Greiner, viz tab. 5. Materiál zvolený firmou ABC byl novinkou a v praxi byl použit pouze na jednom obdobném mostu ve Florianopolis. Jak již bylo uvedeno v kap. 4.1, Silver Bridge měl pouze jeden pár článků s oky v řetězu, navíc firma ABC nemohla otestovat články s oky v reálné velikosti, protože rozměrově překračovaly velikost pracovního prostoru dostupného testovacího stroje, a tudíž byly testovány pouze vzorky speciálně vyrobené pro tyto testy [2]. Tato fakta a nejistoty měly vést spíše k navýšení součinitele bezpečnosti než k jeho snížení [1].

Tab. 5 Srovnání součinitelů bezpečnosti [1]

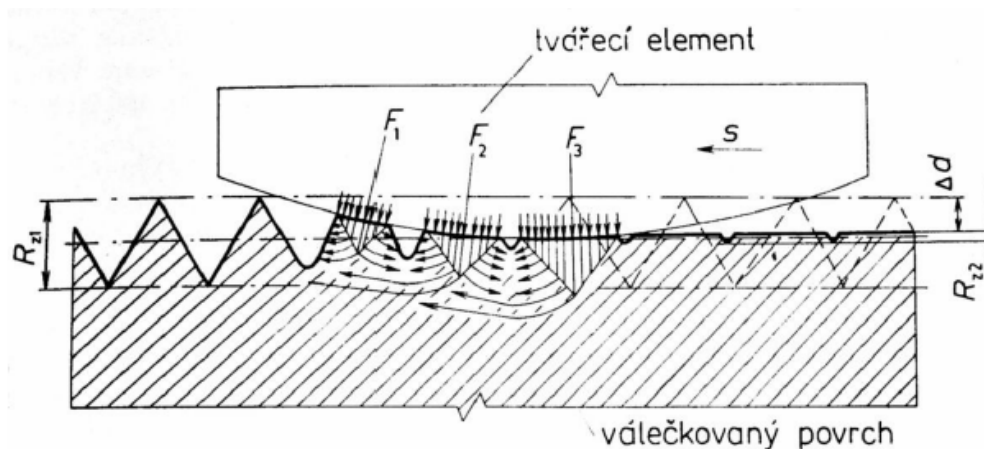
	$K_{k(Re)}$	$K_{k(Rm)}$
American Bridge Company	1.50	2.00
J. E. Greiner Company	1.75	2.75

kde  $K_{k(Re)} = R_e/\sigma_D$  je součinitel bezpečnosti k mezi kluzu,  $K_{k(Rm)} = R_m/\sigma_D$  je součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti a  $\sigma_D$  je dovolené napětí.

### 5.3. Napětí v okolí otvoru pro čep

Jak již bylo zmíněno v kap. 3.1, otvory pro čepy byly do jednotlivých článků s oky vyvrtány až po tepelném zpracování oceli. V návrhu dovolených napětí v konstrukci nebylo zvaženo možné zbytkové napětí způsobené vrtáním. Zbytkové napětí způsobené technologickým procesem vrtání mělo pravděpodobně značný význam při počátečním vzniku trhlin. Z fyzikálního hlediska probíhá proces třískového obrábění, tedy i vrtání, plastickou deformací materiálu za extrémních podmínek, tj. vysoké rychlosti deformace a vysoké teploty, kdy zároveň s plastickou deformací je povrchová vrstva obrobené plochy vystavena

účinku tepla vznikajícího při obrábění. Plasticky deformovaná ohřátá povrchová vrstva se snaží při ochlazování zmenšit svůj objem, čemuž brání spodní chladnější vrstvy. U povrchu tak vznikají tahová napětí, hlouběji v objemu materiálu napětí tlaková. Tahová napětí v povrchové vrstvě snižují mez únavy materiálu a také usnadňují vznik trhlin na kontaktních plochách [4, 9].

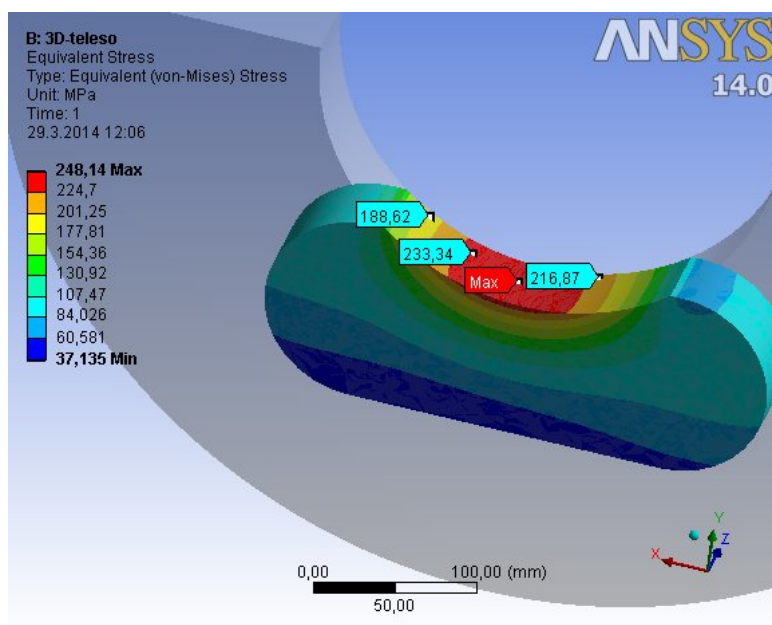


Obr. 16 Schéma průběhu napětí, geometrických a objemových změn materiálu při válečkování [10]

Lze konstatovat, že technologický proces výroby otvorů pro čepy měl být volen s přihlédnutím k pracovním podmínkám těchto článků (tření mezi čepem a otvorem, cyklické namáhání), popř. měla být povrchová vrstva následně zbavena nepříznivých tahových napětí, v lepším případě vnesením tlakových napětí do povrchové vrstvy. Tlakového napětí v povrchové vrstvě lze docílit válečkováním (někdy též označované jako statické kuličkování). Zpevnění povrchu válečkováním je dosaženo vytvořením velkého tlakového napětí na povrchu pomocí tvářecího elementu (válečku). Tlakové napětí musí překročit mez kluzu válečkového materiálu, čímž dojde k přesouvání tvářeného materiálu po skluzových rovinách do povrchových nerovností, tzn. zlepšení drsnosti povrchu, viz obr. 16. V materiálu dochází k plastické deformaci povrchové vrstvy a elastické deformaci hlouběji v materiálu. Elasticky zdeformovaný materiál má snahu vrátit se do původní polohy, ale plasticky zdeformovaná povrchová vrstva brání tomuto zpětnému přetvoření a tím je docíleno tlakových napětí v povrchové vrstvě. Požadovaná hloubka zpevnění povrchových vrstev musí sahát do oblastí, kde již nedochází ke koncentraci napětí, jako jsou vady na povrchu tělesa či trhliny v materiálu. Pokud je splněno toto kritérium, je dosaženo zvýšení meze únavy, eliminuje se vznik koroze a různých mikrovrubů a v konečném důsledku snížení rizika vzniku trhlin v materiálu [10].

Další možnou příčinou pádu mostu mohla být vysoká koncentrace napětí okolo otvoru pro čep. V době výstavby mostu bylo známo, že napětí kolem kruhového otvoru je asi třikrát vyšší než nominální napětí. Pro demonstraci a kontrolu, zda nemohlo dojít k nějaké chybě v pevnostním výpočtu mostu Silver Bridge byla v rámci bakalářské práce provedena analýza napětí kolem otvoru pro čep pomocí metody konečných prvků. Rozměry jednotlivých článků s oky se lišily pouze v délce, díky natočení článků o různé úhly vůči vodorovné poloze, viz obr. 3.





Obr. 17 Velikost redukovaného napětí (dle podmínky HMM) v oblasti lomu

Těleso bylo v programu Ansys Workbench řešeno jako objemové, elementární prvky byly zvoleny hexaedrické, podmínka redukovaného napětí byla stanovena dle HMM. Rozměry modelu odpovídají realitě, zatěžovací síla byla odhadnuta, protože reálné zatížení není přesně známo. V případě zatížení silou 500kN bylo vypočtené napětí v kritickém místě téměř 250 MPa, viz obr. 17. Pro stejnou zátěžnou sílu bylo rovněž vypočteno nominální napětí a napětí s uvažováním součinitele koncentrace napětí  $\alpha=3$ . Výsledky jsou uvedeny v tab. 6. Hodnota napětí vypočtená pomocí MKP vyšla přibližně o 100 MPa vyšší oproti hodnotě napětí, vypočtené z napětí nominálního s předpokladem velikosti součinitele koncentrace napětí  $\alpha=3$ . Z výpočtu plyne, že uvažováním součinitele koncentrace napětí v okolí otvoru pro čep  $\alpha=3$ , se konstruktéři mohli dopustit poměrně velké chyby, která přispěla k rozlomení článku č. 330.

Reálné napětí (jeho absolutní hodnota) v kritickém místě článku č. 330 bylo zcela jistě jiné než napětí vypočtené metodou MKP. Poměr velikosti napětí vypočteného pomocí MKP a napětí nominálního s uvažováním  $\alpha=3$  však bude zachován. Obecně lze konstatovat, že skutečné napětí v okolí otvoru pro čep představovalo asi 170% hodnoty, uvažované při návrhu mostu.

Tab. 6 Vypočtené hodnoty napětí v okolí otvoru pro čep

Způsob výpočtu	Velikost napětí [MPa]
$\sigma_{nom}$	48
MKP	248
$\alpha \cdot \sigma_{nom}$	144

## 5.4. Volba použitého materiálu

V kapitole 4.2 jsou uvedeny výsledky zkoušek rázem v ohybu, na základě kterých lze konstatovat, že běžné provozní teploty mostní konstrukce byly hluboko pod současnými normami doporučenou tranzitní teplotou  $t_{27J}$ . To se týká i teploty v okamžiku havárie mostu. Výsledky zkoušky jednoznačně vypovídají o náchylnosti oceli ke křehkému lomu. Rovněž byla prokázána poměrně nízká úroveň lomové houževnatosti oceli, ovšem tuto skutečnost nelze považovat za chybu v návrhu konstrukce. Most byl postaven v roce 1928, kdy nebyla lomová houževnatost jakožto materiálová charakteristika známa.

Aspekt, který naopak mohl a měl být zvážen při volbě materiálu je skutečnost, že v době stavby mostu byl zvolený materiál novinkou a nebyl v reálných podmínkách téměř prověřen. Články s oky byly navíc velmi rozměrné a svými rozměry přesahovaly velikost pracovního prostoru dostupných zkušebních strojů. Díky této skutečnosti nemohly být provedeny zatěžovací zkoušky článků v reálné velikosti. Měl být tedy zvolen raději materiál, který již byl v praxi prověřen i na rozměrných konstrukcích [2].

## 5.5. Koroze pod napětím

Určujícím mechanismem lomu v případě havárie mostu Silver Bridge byla pravděpodobně koroze pod napětím. Vysokým reálným napětím v okolí otvoru pro čep a volbou nevhodného materiálu byly vytvořeny optimální podmínky pro uvedený mechanismus lomu. Počáteční ostrá trhлина na zkorodovaném povrchu iniciovaná z korozního důlku byla vytvořena cyklickým zatěžováním a následně rostla účinkem koroze pod napětím. Trhlinou začalo postupně do materiálu pronikat korozní médium. Pevnost materiálu byla narušena, vlivem koroze není možné vytvářet větší plastické zóny před čelem postupující trhliny, a tudíž se materiál brání tím, že se trhлина začne větvit. Spolu se zvětšováním celkové plochy trhlin však narůstá i intenzita pronikání korozního média a efekt koroze se násobí. Rychlost tohoto procesu mnohonásobně překoná rychlost šíření únavové trhliny, mnohdy až 16x [5].

Koroze pod napětím je velice těžce detekovatelná a předvídatelná. Obvykle k jejímu vzniku dochází v místech, kde jsou defekty hlubší (např. ostrá trhлина způsobená únavou) než na provozem běžně poškozeném povrchu. Pro eliminaci tohoto mechanismu poškozování součásti je nutné vyrobit velice jakostní povrch a izolovaný tak, aby bylo zabráněno napadení povrchu korozí [5].

## 6. Závěr

Náhlý pád mostu Silver Bridge, který byl pravidelně kontrolován, byl zpočátku těžce pochopitelný. Vyšetřováním byly zjištěny pravděpodobné příčiny pádu. Jednotlivé příčiny spolu úzce souvisely a lze konstatovat, že absencí pouze jediné z nich by k havárii pravděpodobně nedošlo.

V rozboru příčin havárie není uvedena zmínka o možnosti lomu vlivem únavy materiálu. Ve vyšetřovací zprávě [4] je tento mechanismus lomu vyvrácen pomocí výpočtu cyklů do lomu. Jako jeden cyklus je ve výpočtu uvažováno zatížení od vlastní konstrukce (dead load) až po maximální dovolené zatížení mostu (maximum live load). Počet cyklů pro vytvoření trhliny o velikosti 3 mm je 541 000, což je pro mostní konstrukci prakticky nedosažitelná hodnota (odpovídá 37 takovýmto cyklům na každý den po 40 let provozu mostu).

Havárie mostu Silver Bridge nastala z důvodu kombinace několika faktorů, jejichž jednotlivý podíl nelze přesně určit.

S velkou mírou pravděpodobnosti lze značný vliv přisoudit vysoké hodnotě napětí v okolí otvoru pro čep. V kapitole 5.3 bylo ukázáno, že hodnota skutečného napětí dosahovala přibližně 170% hodnoty napětí, uvažovaného při návrhu mostu. Vzhledem k uvažovanému součiniteli bezpečnosti ( $K_{k(Re)} = 1,5$ ) se lze domnívat, že maximální dovolené pracovní napětí v oblasti otvoru pro čep bylo pravděpodobně velmi blízké napětí na mezi kluzu použité oceli.

Dalším faktorem, který zcela jistě přispěl k havárii mostu byl výběr materiálu s velmi nízkou odolností proti křehkému lomu a s poměrně nízkou hodnotou lomové houževnatosti. Nevhodný výběr materiálu způsobil, že pouze malý defekt ve struktuře materiálu mohl způsobit nestabilní lom. Je ovšem nutné zmínit, že tyto pravděpodobně zásadní příčiny havárie, zejména nízká hodnota lomové houževnatosti, nemohly být v době výstavby mostu takto jasně specifikovány, protože přístupy lomové mechaniky (použitelné např. pro určení kritické velikosti vady) ještě nebyly známy. Také teorie popisující napjatost v zakřivených prutech (model otvoru pro čep) nebyla známa.

Velmi vážnou se jeví absence bezpečnostních prvků v konstrukci mostu. Práce [2] se zabývá konstrukcí velmi podobného mostu postaveného v roce 1925 ve Florianopolis. Jsou v ní popsány použité konstrukční bezpečnostní prvky, zavedené s ohledem na výše uvedené rizikové faktory. V konstrukci mostu Silver Bridge však podobné bezpečnostní prvky chyběly a tudíž byla spolehlivost mostu plně závislá na použitém materiálu a správnosti konstrukčního návrhu. Nejistoty, které měly být vzaty v potaz, v úvahu vzaty nebyly, což lze považovat za chybu, která měla v případě mostu Silver Bridge fatální následky.

Dalším výrazným nedostatkem v konstrukci byla špatná kvalita povrchu v kontaktní oblasti čep-otvor. Toto místo navíc nebylo žádným způsobem izolováno před možným napadením koroze. Nekvalitní povrch a absence izolace byly hlavní příčinou vzniku povrchové koroze v kontaktní oblasti. Povrchová koroze spolu s cyklickým charakterem zatěžování mostu vytvořily podmínky pro vznik trhlin, díky kterým bylo umožněno koroznímu médiu proniknout do materiálu a vytvořit tak podmínky pro porušování mechanismem koroze pod napětím. Tento typ porušení byl při inspekcích mostu velmi těžko odhalitelný, což bylo pravděpodobně důvodem, proč nebyla vadná součást vyměněna před okamžikem totální ztráty funkčnosti.

Z dnešního pohledu se chyby v konstrukci zdají zřejmé. Nutno však dodat, že znalosti v oblasti materiálů a konstrukcí mostů byly od doby stavby mostu Silver Bridge značně prohloubeny a tudíž nelze zcela objektivně posuzovat chybná rozhodnutí ze strany tehdejších konstruktérů. V každém případě lze díky důkladnému vyšetřování, které následovalo po havárii mostu Silver Bridge, podobným chybám v budoucnu předcházet.

## 7. Použitá literatura

- [1] Lichtenstein, Abba G. *The Silver Bridge Collapse Recounted*. Journal of Performance of Constructed Facilities. 1993, Sv. 7, 4.
- [2] Steinman, D.B. *Design of Florianopolis suspension bridge*. 20, New York : Engineering News-record, 1924, Sv. 93.
- [3] Janíček, P., Ondráček, E. a Vrbka, J. *Mechanika těles - pružnost pevnost I*. Brno : SNTL Praha, 1986.
- [4] Bennett, J. A. a Mindlin, Harold. *Metallurgical Aspects of the Failure of the Point Pleasant Bridge*. Journal of Testing and Evaluation. 1973, Sv. 1, 2.
- [5] Slavík, Jaromír. *Koroze a její vliv na pevnost a životnost konstrukcí z ocelí*. Brno : Fakulta strojního inženýrství v Brně a Asociace strojních inženýrů, 1998. ISBN 80-214-1109-0.
- [6] Schindler, Jiří. *Strojírenské vývojové centrum*. [Online] Střední uměleckoprůmyslová škola. [Citace: 21. duben 2014.] <http://konstrukce.webz.cz/sups/2tuko2.html>.
- [7] Veles, Pavol. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. Bratislava : Alfa, 1985.
- [8] E399, ASTM. *Standard Test Method for Plain-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*.
- [9] Yuanqing, Wang a Yun, Lin. *Materials Science and Engineering*. [Online] [Citace: 22. Květen 2014.] <http://www.scientific.net/AMR.250-253.574>.
- [10] Kolařík, Kamil, Ganey, Nikolaj a Barcal, Jaroslav. *Analýza zbytkové napjatosti vysokopevnostní slitiny*. Materials Structure. 2005, Sv. 12, 2.
- [11] Bezrouková, M. *Technologie válečkování ve strojírenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. str. 41. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D..

## 8. Seznam použitých symbolů a zkratek

$R_e$	mez kluzu
$R_m$	mez pevnosti
$\sigma_D$	dovolené napětí
$\sigma_C$	lomové napětí
$\sigma_{nom}$	nominální napětí
$\alpha$	součinitel koncentrace napětí
$K_{k(Re)}$	součinitel bezpečnosti k mezi kluzu
$K_{k(Rm)}$	součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti
KV	nárazová práce měřená na tělese s V-vrubem
$K_{IC}$	lomová houževnatost
Q	tvarový faktor
a	délka trhliny
$t_{27J}$	tranzitní teplota

MKP	metoda konečných prvků
NTSB	National Transportation Safety Board
SFT	surface fland test
SENB	Single Edge Notch Bend
ABC	American Bridge Company
USD	americký dolar

## 9. Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1	Havárie mostu Silver Bridge
Obr. 2	Visutý most Silver Bridge
Obr. 3	Geometrie článků s oky, rozměry v mm
Obr. 4	Visutý most Three Sister's Bridge, Pittsburgh – multiparalelní „eyebars” systém
Obr. 5	Konstrukce nosných věží mostu Silver Bridge
Obr. 6	Hlavní rozměry (v metrech) mostu Silver Bridge
Obr. 7	Rozlomený článek s oky číslo 330. Štěpný lom na pravé straně, tvárný vlevo
Obr. 8	Schéma průběhu ohybového napětí po průřezu kolem otvoru pro čep
Obr. 9	Povrch otvoru pro čep přiléhající štěpné lomové ploše. Vnější kus
Obr. 10	Štěpná lomová plocha na vnějším kusu
Obr. 11	Rozvětvené trhliny. Zvětšení 80x
Obr. 12	Závislost tvrdosti dle Vickerse směrem do středu článku s oky č. 330
Obr. 13	Teplotní závislost nárazové práce
Obr. 14	Počáteční konfigurace pro „celočlánekovou“ zkoušku lomové houževnatosti
Obr. 15	Závislost meze kluzu oceli Q460C na teplotě zkoušky
Obr. 16	Schéma průběhu napětí, geometrických a objemových změn materiálu při válečkování
Obr. 17	Velikost redukovaného napětí (dle podmínky HMM) v oblasti lomu
Tab. 1	Chemické složení použité oceli (hm. %)
Tab. 2	Meze kluzu a meze pevnosti určené zkouškou tahem pro materiál z vnějších a střední vrstvy
Tab. 3	Hodnoty nárazové práce v závislosti na teplotě
Tab. 4	Lomová houževnatost $K_{IC}$ zjištěná pomocí SENB a SFT zkušebních těles
Tab. 5	Srovnání součinitelů bezpečnosti
Tab. 6	Vypočtené hodnoty napětí v okolí otvoru pro čep